

Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und
Landmanagement

Band: 108 (2010)

Heft: 12: AlpTransit

Artikel: Astrogeodätische Lotabweichungs- und Azimutmessungen für
AlpTransit

Autor: Bürki, Beat / Guillaume, Sébastien

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-236737>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Astrogeodätische Lotabweichungs- und Azimutmessungen für AlpTransit

Bereits vor Baubeginn erforderten die auszuführenden Vermessungsarbeiten am Jahrhundert-Bauwerk Gotthard-Basistunnel zwingenderweise eine umfassende Machbarkeits- und Genauigkeitsanalyse. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit solch anspruchsvoller Vermessungswerke sind möglichst alle zur Verfügung stehenden unabhängigen Messverfahren beizuziehen. Insbesondere muss der systematisch wirkende Einfluss des Schwerefeldes auf alle lotbezogenen Messungen wie Nivellements-, Lotungs-, Theodolit- und Kreismessungen möglichst genau bekannt bzw. berechenbar sein. Voraussetzung dazu ist die genaue Kenntnis des Schwerefeldes in Form des Geoidverlaufes, von Lotabweichungen und von Schwerewerten. Der vorliegende Artikel beschreibt die astrogeodätischen Kontrollmessungen, die von der ETH Zürich im Auftrag des Vermessungskonsortiums VI-GBT zur Überprüfung der verwendeten Korrekturwerte bei Kreismessungen im Sommer 2005 durchgeführt wurden. Ein weiterer Punkt fokussiert auf die Frage, ob das im Projekt verwendete Geoidmodell CHGeo98 den Genauigkeitsansprüchen zu genügen vermochte, oder ob neue Lotrichtungsmessungen und das daraus neu berechnete Geoidmodell CHGeo2004 eine Neuberechnung der Korrekturwerte erforderlich machten.

Avant-même le début de la construction de l'ouvrage séculaire du tunnel de base du Saint-Gothard les travaux de mensuration y relatifs exigent obligatoirement une analyse globale de faisabilité et de précision. Afin d'augmenter la fiabilité d'une œuvre de mensuration aussi importante il y a lieu d'utiliser si possible toutes les méthodes de mensuration indépendantes disponibles. Il s'agit notamment de connaître et pouvoir calculer le mieux possible l'influence systématique du champ de gravitation sur toutes les mesures dépendant de l'aplomb soit nivellement, verticalité, théodolite et gyroscope. La condition indispensable à ce sujet est la connaissance précise du champ de gravitation en ce qui concerne la forme du géoïde, les déviations de l'aplomb et les valeurs de gravité. Le présent article décrit les mesures de contrôle astrogéodésiques exécutées en été 2005 par l'EPF Zürich par mandat du Consortium de mensuration VI-GBT pour l'examen des valeurs de correction utilisées pour des mesures au gyroscope. Un autre point se focalise sur la question de savoir si le modèle du géoïde CHGeo98 utilisé dans le projet a pu satisfaire aux exigences de précision ou si de nouvelles mesures d'aplomb et le modèle du géoïde CHGeo2004 nouvellement calculé sur cette base ont rendu nécessaire une nouvelle calculation des valeurs de correction.

Già prima dell'inizio della costruzione, le opere di misurazione dell'opera del secolo, cioè la galleria di base del Gottardo, hanno obbligatoriamente comportato un'analisi esaustiva di fattibilità e precisione. Per aumentare l'affidabilità di misurazioni così esigenti bisogna prendere in considerazione tutti i processi indipendenti di misurazione. In particolare, bisogna conoscere e calcolare l'influsso sistematico del campo gravitazionale su tutte le misurazioni inerenti al lotto, come le misurazioni di livellazione e scandagliamento, con il teodolite e il giroscopio. Il presupposto consiste nella conoscenza esatta del campo gravitazionale sotto forma di andamento geoide, degli scostamenti di scandagliamento e dei valori gravitazionali. In quest'articolo vengono

B. Bürki, S. Guillaume

1. Einleitung

Die erfolgreiche Durchführung eines so ambitionierten Jahrhundert-Projektes wie die neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) mit dem Gotthard-Basistunnel ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Neben finanztechnischen Aspekten, die vor allem parlamentarische Hürden zu überwinden haben, müssen zahllose Fragen zur Durchführbarkeit aus politischer, technischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht bearbeitet und beantwortet werden. Dazu beschäftigt sich ein ganzes Heer von Planern, Ingenieuren, Geologen, Hydrologen, Verkehrs- und Energieexperten, Bergbauspezialisten, Juristen, und, nicht zuletzt, Vermessungs- bzw. Geomatikingenieuren mit einem breiten Spektrum von Problemen, die ein solches Jahrhundertbauwerk mit sich bringt.

Aus vermessungstechnischer Hinsicht stellt die Einhaltung der von der Bauherrschaft vorgegebenen Durchschlagsgenauigkeit die wohl grösste Herausforderung dar. Um diese alles entscheidende Vorgabe einhalten zu können, müssen sämtliche möglichen Fehlerquellen und deren Auswirkung auf die Ausführungsgenauigkeit genau untersucht und ins Pflichtenheft der Vermessungsspezialisten aufgenommen werden. Die bisher weltweit noch nie realisierte Länge des Gotthard-Basistunnels stellt mit 57 km die grosse Herausforderung an die Vermessung dar. Dank der bautechnischen Aufteilung des Vortriebs auf fünf Teilvortriebe, die einen beschleunigten Bauablauf ermöglichten, erreichen die einzelnen Vortriebslängen maximal 23.3 km (Vortrieb Faido–Sedrun). Trotz dieser «Vereinfachung» stellen die einzelnen Lose eine grosse Herausforderung an die Qualität der Vermessung dar. Infolge erschwelter Umgebungsbedingungen auf den Baustellen müssen die vorausgerechneten Vortriebsrichtungen mit grösster Sorgfalt und unter Beachtung aller möglichen Fehlerquellen auf die Tunnelbrust übertragen werden (Haag, R. et. al. 1996, Haag, R. et al. 1998, Stengele und Haag 1998,

descritte le misurazioni astrogeodesiche di controllo, effettuate nell'estate 2005 dal Politecnico di Zurigo su incarico del consorzio di VI-GBT per verificare i valori di correzione utilizzati nelle misurazioni con il giroscopio. Un ulteriore accento viene posto sull'interrogativo se il modello di geoide CHGeo98 utilizzato nel progetto soddisfa i requisiti di precisione oppure se si impongono nuove misurazioni di scandagliamento e se il modello di geoide nuovamente calcolato CHGeo2004 necessita di un nuovo calcolo dei valori di correzione.

Schätti 2006, Schätti und Ryf 2007, Stengele 2007). Die Richtungsübertragung von den Portalnetzen auf die Tunnelbrüst erfolgt klassischerweise mittels Richtungsübertragung in offenen und übergreifenden Polygonzügen. Anhand einer umfassenden Netzanalyse wurde im Vorfeld des Vorhabens von der Bauherrschaft dem mit allen vermessungstechnischen Arbeiten beauftragten «Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel» (VI-GBT) der zulässige Durchschlagsfehler in Querrichtung mit 10 cm (1 Sigma) und mit 5 cm in der Höhe vorgegeben. Zudem sollen Lagekoordinaten mit einer Zuverlässigkeit (maximal zulässiger Fehler) von 25 cm und Höhen mit 12.5 cm bestimmt werden (Haag et. al. 1996, Haag und Stengele 1999, Stengele 2007). Diese strengen Genauigkeitsvorgaben können nur unter Beizug von unabhängigen Messmethoden wie zum Beispiel Schwer- und Kreismessungen erreicht werden. Die Resultate der Grundlagen- und Kreismessungen ihrerseits können von astro-geodätischen Azimut- und Lotrichtungsmessungen als weitere methodisch unabhängige Kontrolle profitieren und so die Zuverlässigkeit des gesamten Vermessungswerkes erhöhen. Im Kontext von Untertagebauten wie dem Gotthard-Basistunnel spielt der Einfluss des Erdschwerefeldes auf die Messungen eine wichtige Rolle. Die auffälligste Ausprägung des Schwerefeldes macht sich in Form der Lotabweichung bemerkbar, die die Abweichung der örtlichen Lotlinie gegenüber der Normalen auf die Rechenfläche des Bezugsellipsoids beschreibt. Diese Abweichung wird üblicherweise in zwei Komponenten in Nord-Süd und in Ost-West Richtung dargestellt:

$$\text{Nord-Südkomponente: } \xi = \Phi - \varphi \quad (1)$$

$$\text{Ost-Westkomponente:}$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos(\varphi) \quad (2)$$

mit: Φ, Λ = astronomische Breite und Länge, bestimmt mit astro-geodätischen Messverfahren (z.B. mittels Zenitkamera) oder berechnet, basierend auf gemessenen Stützpunkten und digitalen Massen- und Geländemodellen.

φ, λ = geodätische (ellipsoidische) Breite und Länge, bestimmt mit GNSS oder aus Landeskoordinaten auf das Bezugsellipsoid transformiert.

Durch die Schiefe der physikalischen Lotlinie gegenüber der mathematischen (ellipsoidischen) Lotlinie beeinflusst die Lotabweichung die Messungen systematisch wie eine Stehachsschiefe des Instrumentes. Eine Richtungskorrektur infolge der Lotabweichung bzw. Stehachsschiefe ist vom Azimut α der Visur und dem Zenitwinkel z abhängig:

$$dr = -(\xi \cdot \sin \alpha - \eta \cdot \cos \alpha) \cdot \cot(z) \quad (3)$$

Die *Laplace-Gleichung* beschreibt die Differenz zwischen astronomischen und ellipsoidischen Azimuten:

$$dA = -\eta \cdot \tan \varphi - (\xi \cdot \sin \alpha - \eta \cdot \cos \alpha) \cdot \cot(z) \quad (4)$$

Bei Messungen mit Instrumenten früherer Bauweise wurde die Stehachsschiefe in aller Regel nicht erfasst. Daher war es nicht möglich, diese, durch ungenaue Instrumentenhorizontierung bedingte Fehlerquelle, vom systematischen Einfluss der Lotabweichung zu trennen. Im Gegensatz

dazu sind moderne Tachymeter bzw. Totalstationen mit Zweiachskompensatoren (Neigungsmessern) ausgestattet, die die Stehachsschiefe messen und die Messwerte rechnerisch korrigieren (sofern der Kompensator eingeschaltet ist!). Dadurch beeinflusst einzig die Lotabweichung die einzelnen Messungen gem. Formel (4).

Bei der Reduktion der Kreiselazimute ist zu beachten, dass die Komponenten ξ und η der Lotabweichung infolge der Lotkrümmung jeweils auf die Meereshöhe der Instrumentenstationierung bezogen sein müssen. Ein exemplarischer Vergleich am Vertikalschacht in Sedrun zeigt, dass sich die Lotabweichung auf die rund 800 m zwischen Schachtkopf und Schachtfuss in Nord-Südrichtung um -6.1 cc (-0.61 mgon) und in Ost-Westrichtung um -3.2 cc (-0.32 mgon) ändert. Bezogen auf die Tunnelsohle ergibt die genaue Analyse der *Laplace-Gleichung* folgende Korrekturen:

1. Term: -49 cc bis $+20$ cc
2. Term: -0.11 cc bis $+0.05$ cc (für Visuren im Azimut 0°) und -0.35 cc bis $+0.11$ cc (für Visuren im Azimut 90°)

Diese Zahlen zeigen, dass der erste Term signifikant grösser ist als die Messgenauigkeit. Daher ist er zwingend zu berücksichtigen, um die gemessenen Kreiselazimute auf die Rechenfläche des Ellipsoids (Landeskoordinaten) reduzieren und mit den terrestrischen Netazimuten vergleichen zu können. Der zweite Term kann hingegen problemlos vernachlässigt werden, da er wesentlich kleiner als die Messgenauigkeit ausfällt.

Theoretisch sind zusätzlich noch weitere Korrekturen zu berücksichtigen:

Instrumenten-unabhängige Korrekturen:

- Momentane Lage der Erdrotationsachse \rightarrow Reduktion auf mittleren Pol CIO (Conventional International Origin)
- Meridiankonvergenz \rightarrow Reduktion auf geographisch Nord
- Meereshöhe der Zielpunkte (Schiefe der Ellipsoidnormalen im Zielpunkt gegenüber Ellipsoidnormalen im Standpunkt)
- Richtungsreduktion Ellipsoid – Kugel – Ebene (geodätische Linie – Grosskreis – Gerade in Projektionsebene)

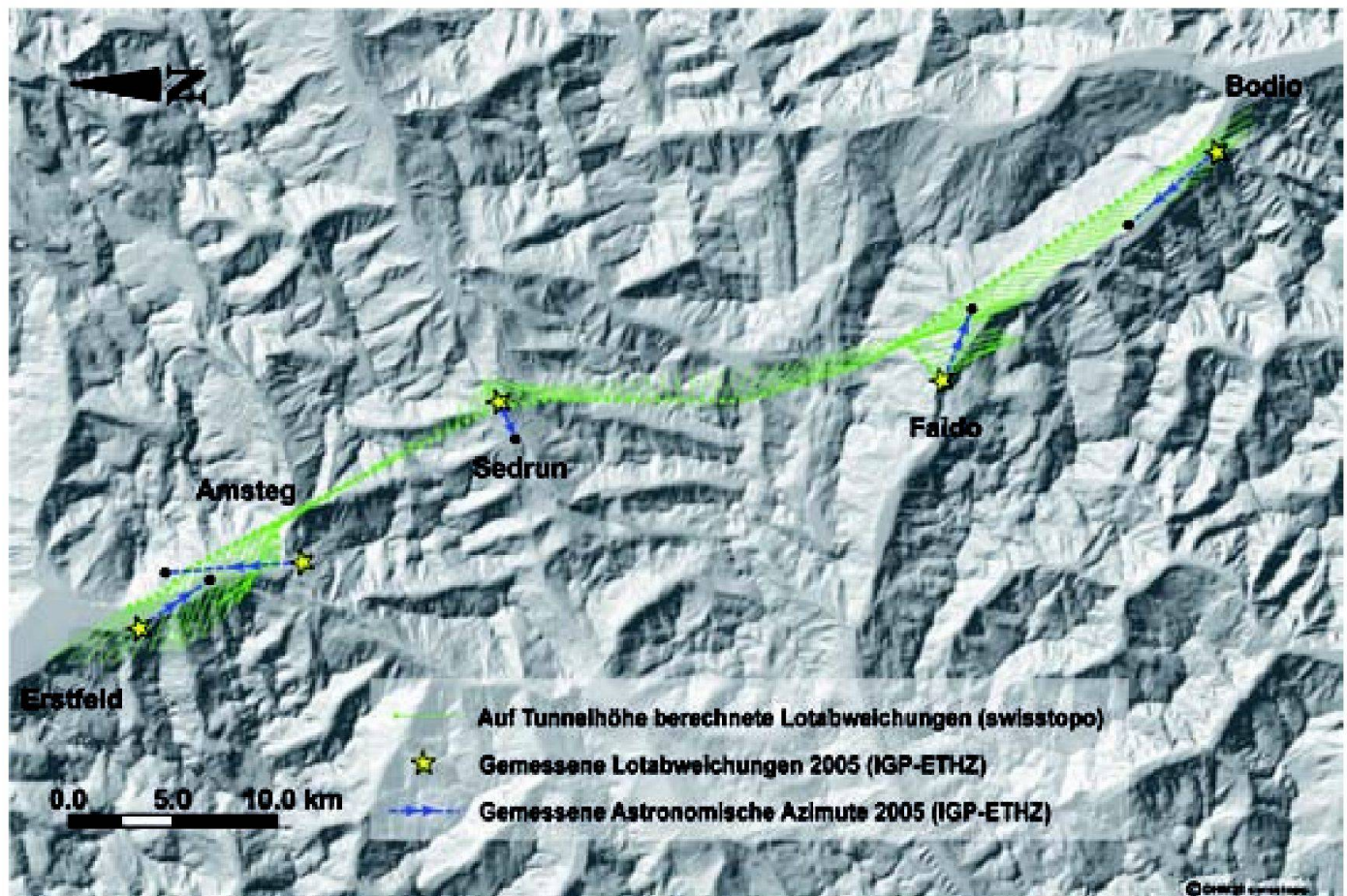


Abb. 1: Verlauf der Lotabweichungen auf Tunnelhöhe entlang der Achse des Gotthard Basistunnels. Die gelben Sterne bezeichnen die Zenitkamera-Standorte und die blauen Pfeile verweisen auf die gemessenen astronomischen Azimute.

Instrumentelle Kreisel-Korrekturen:

- Nullpunktkorrektur (Eichwert)
- Driftverhalten (zeitliche Konstanz des Kalibrierwertes)
- Reaktionsverhalten des Instruments bei Temperaturschwankungen

Für die praktische Arbeit auf der Baustelle bedeutet dies, dass der mit Kreismessungen beauftragte Vermessungs- bzw. Geomatikingenieur das Instrument regelmässigen Kontrollmessungen bei guten Bedingungen unterziehen muss und zwingend über Kenntnisse des Schwerfeldes verfügen muss (Zanini, 1993).

2. Das Schwerfeld im Gebiet des Gotthard-Basistunnels

2.1 Lotabweichungen

Lotabweichungen lassen sich entweder im Feld direkt beobachten (zum Beispiel

mit Zenitkameras), oder aufgrund von Gelände- und Massenmodellen berechnen. Die erreichbare Genauigkeit hängt dabei von der Qualität und Dichte des bestehenden Stationsnetzes mit gemessenen Lotabweichungen ab. In der Schweiz be-

steht ein Netz von rund 650 beobachteten Lotabweichungsstationen, die in erster Linie für die Geoidberechnung gemessen wurden. Dieses bildet nunmehr die Grundlage für die Interpolation von Lotabweichungen an beliebigen Punkten

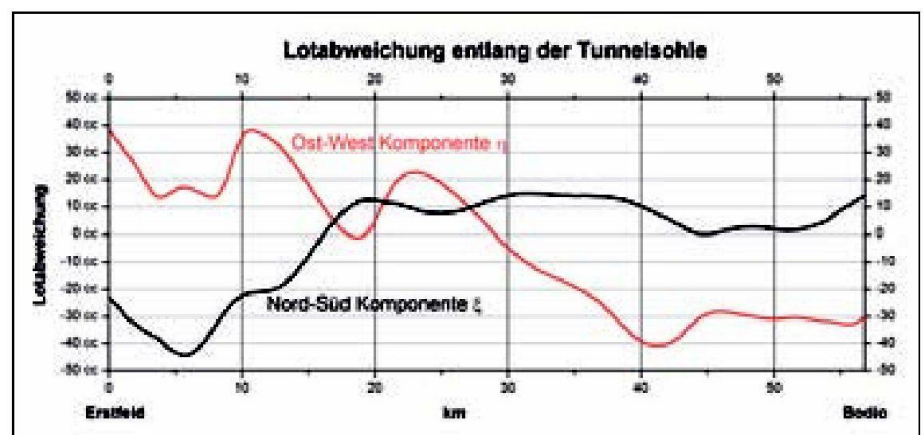


Abb. 2: Verlauf der Lotabweichungskomponenten ξ und η entlang der Tunnelachse.

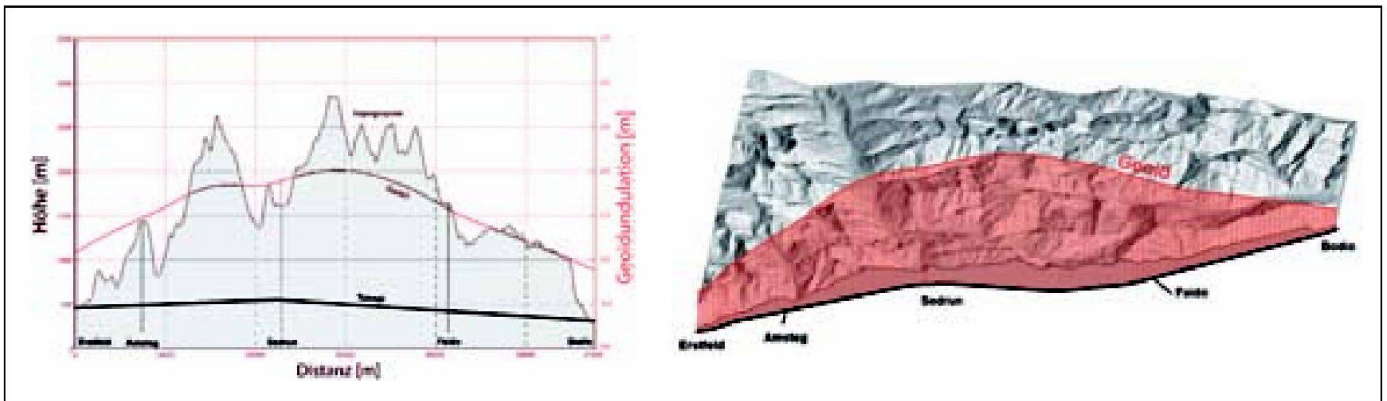


Abb. 3: Verlauf des Geoids CHGeo98 im Bereich des Gotthard Basistunnels als Profil (links) und in der Ansicht. Erkennbar ist die schwache Korrelation zwischen der Topographie und dem Geoidverlauf. Auffallend ist auch der praktisch lineare Verlauf in den Bereichen Erstfeld-Amsteg und Faido-Bodio.

mit einer Genauigkeit von 0.8" bis 1". Basierend auf der Geoidlösung CHGeo98 und den verfügbaren Gelände- und Massenmodellen wurden die Lotabweichungen entlang der Achse des Gotthard-Basistunnels auf Höhe der Tunnelsohle berechnet und für die Korrekturen der Kreismessungen bereitgestellt. Die grafische Darstellung in Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Lotabweichungen sowie die astrogeodätischen Messstationen der ETH Zürich im Projektbereich. Eine modellbasierte Berechnung der Lotabweichung als Profile entlang der Tunnelachse ergibt den in Abbildung 2 gezeigten Verlauf.

2.2 Geoidundulationen

Die Lagebestimmung von Punktkoordinaten bezieht sich auf das mathematisch einfach beschreibbare Bessel-Ellipsoid im Datum der Schweizerischen Landesvermessung. Die Höhenbestimmung andererseits beruht auf der physikalisch definierten Fläche des Geoids. Mathematisch lässt sich die Struktur des Geoids nicht so einfach wie das Ellipsoid beschreiben, da das Geoid von der Massenverteilung abhängt und dadurch Korrelationen mit der Topographie zeigt. Dies ist auch der Grund, dass klassischerweise die Lage- und Höhenberechnungen getrennt behandelt werden, wie zum Beispiel bei der Software Ltop. Im Projekt Alptransit wurde mit dem Höhenbezugsrahmen LN02 unter Berücksichtigung des neuen streng or-

thometrischen Höhensystems LHN95 gerechnet. Als Bezugsfläche diente dazu das Geoidmodell CHGeo98. Die Abbildung 3 zeigt den Verlauf des Geoids entlang der Tunnelachse.

3. Die astro-geodätischen Kontrollmessungen der ETH Zürich

Durch Vermittlung des Schweizerischen Konsortiums Schwere (SKS) erhielt das Geodäsie und Geodynamik Labor (GGL) der ETH Zürich vom VI-GBT den Auftrag, Lotabweichungen bzw. astronomische Azimute auf den Kreisel-Eichstrecken der Portalnetze Amsteg, Erstfeld, Sedrun, Faido und Bodio durch zu führen (Lage der Stationen siehe Abb. 1). Parallel dazu wurden von der Universität Lausanne (P.V. Radozna) Schweremessungen zur Berechnung der orthometrischen Korrekturen durchgeführt. Die Messungen sollen zur Validierung und unabhängigen Qualitätskontrolle der verwendeten Lage- und Höhenkorrekturen und Lotabweichungen für die Kreismessungen dienen. Die Resultate dieser Arbeiten wurden dokumentiert und der Auftraggeberin VI-GBT bzw. ATG weiter geleitet (Bürki et. al, 2005).

3.1 Azimutmessungen

Die astrogeodätischen Azimutmessungen wurden im Rahmen des Geodätischen Projektkurses 2005 (Diplomver-

messungskurs) der ETH Zürich von den Studenten David Grimm, Florian Buol und Sébastien Guillaume unter der Leitung von Dr. B. Bürki und Dipl. Ing. A. Ryf durchgeführt. Zu diesem Zweck kam das am GGL entwickelte on-line Messsystem «ICARUS» bzw. «AZIMUT» zum Einsatz. Dieses automatisierte Messsystem be-



Abb. 4: Mitautor Sébastien Guillaume als Geomatik-Student am Messen eines astro-geodätischen Azimuts zwischen einer terrestrischen Mire und dem Polarstern (α Ursae Minoris).

steht aus einer mit Steilsichtprisma ausgerüsteten Totalstation TCA 1800 von Leica Geosystems, einem speziellen GPS-Empfänger für die Zeitregistrierung mittels Handstopper, einer Interfacebox, einem Feldrechner sowie der entsprechenden Software (s. Abbildung 4). Diese hat einen angepassten Sternkatalog hinterlegt und steuert den motorisierten Theodoliten, besorgt die automatisierte Datenerfassung und erledigt die Datenauswertung inklusive der erzielten Genauigkeiten in Echtzeit direkt im Feld. Nach einer sorgfältig geplanten Überprüfung der verschiedenen Miren (Zielmarken für die astronomischen Azimutmessungen) wurde der Beschluss gefasst, für die Messungen einfache und unbeleuchtete Rundprismen zu verwenden und dazu die Automatische Target Recognition Funktion (ATR) der Totalstation einzusetzen. Im Verlauf der Messungen hat sich die ATR-Methode als sehr zuverlässig erwiesen, mit dem grossen Vorteil, dass die Miren keine aktive Beleuchtung benötigten. Einzig das Auffinden der Zielpunkte in der Nacht war nicht immer einfach, aber die von den Reflektoren zurückgeschickten Such-Strahlen einer starken Taschenlampe genügten für die erste Grobanzielung mit der Totalstation. In der Folge waren die Messungen sehr einfach durchzuführen, da das verwendete Messsystem ICARUS/AZIMUT die Einstellelemente kennt und die Ziele automatisch angefahren werden. Dies vereinfacht den Messablauf und verhindert zudem Ablesefehler. Erstaunlicherweise funktionierte die ATR-Methode über wesentlich längere Distanzen als in den Hersteller-Spezifikationen angegeben. Diese sind als Werte für den Tagesbetrieb unter Normalbedingungen zu verstehen. Die Nachtmessungen konnten so ohne Einschränkungen auf Strecken bis 6.5 km ausgedehnt werden. Unterschiede in den Anzielungen mit und ohne ATR konnten anhand gezielter Vergleichsmessungen nicht festgestellt werden.

Sämtliche mit dieser Ausrüstung durchgeführten Azimutmessungen wurden in zwei Lagen und, je nach Wettersituation, bis zu fünf Mal gemessen. Die Resultate

der 5 Azimutmessungen ergaben innere Genauigkeiten zwischen 0.1" und 0.8" (0.03 und 0.24 mgon), was in Anbetracht der von Leica angegebenen instrumentellen Genauigkeit des TCA 1800 von 1" bzw. 0.3 mgon als sehr gut betrachtet werden kann.

3.2 Lotrichtungsmessungen

Diese konnten mit zwei nahezu baugleichen Zenitkamera-Messsystemen durchgeführt werden. Im Zuge einer gemeinsamen Messkampagne unmittelbar vor den Messungen für AlpTransit standen das ETH-Messsystem DIADEM (Digital Astronomical Deflection Measuring System) und das System TZK2-D (Transportable ZenitKamera 2- Digitale Version) der Leibniz Universität Hannover im Unterengadin im Einsatz. Durch diese günstige Konstellation ermöglichten die vom Auftraggeber gewünschten Lotrichtungsmessungen mit zwei hochgenauen Messsystemen, was eine willkommene gegenseitige Kontrolle ermöglichte. Abbildung 5 zeigt die beiden Instrumente im Einsatz.

3.3 Das Messprinzip von astrogeodätischen Zenitkameras

Digitale Zenitkameras, wie sie am Geodäsie und Geodynamik Labor (GGL) der

ETH Zürich und am Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover (IFE) eingesetzt werden, dienen der hochgenauen Bestimmung der physikalischen Lotrichtung mittels photographischer Richtungsmessung zu Sternen. Das auf einem CCD-Sensor abgebildete Sternfeld im Zenit wird unter Kenntnis der exakten Belichtungszeitpunkte (sog. Epochen) und der Näherungskordinaten der Station dem berechneten Referenzsternfeld aus dem Sternkatalog (z.B. Tycho-2 oder UCAC) gegenübergestellt und automatisch identifiziert. Neben einer leistungsfähigen Optik und einer geeigneten CCD-Kamera sind beim DIADEM drei Paare von äusserst empfindlichen Neigungssensoren in jeweils paarweise rechtwinkliger Anordnung montiert. Nach Anbringung der gemessenen und in Echtzeit gefilterten Neigungswerte und weiterer umfangreicher Korrekturen, repräsentiert der in das Sternfeld interpolierte Durchstosspunkt der Kameradrehachse (gemittelt aus zwei Lagen) die Richtung der physikalischen Lotlinie, ausgedrückt durch die *Lotrichtungparameter astronomische Breite Φ und Länge Λ* . Mit den Gleichungen (1) und (2) lassen sich daraus die Lotabweichungskomponenten ξ und η bestimmen (Hirt und Bürki, 2002, Bürki



Abb. 5: Die beiden digitalen Zenitkamera-Systeme der Leibniz Universität Hannover (links) und der ETH Zürich (rechts) im Einsatz bei der Messung des Portalfeilers Erstfeld (im Hintergrund sichtbar).

et. al. 2005). Mit den neuesten und verbesserten Versionen der Kameras wird eine Genauigkeit der Lotabweichungskomponenten von 0.05 Bogensekunden erreicht.

3.4 Durchführung

Für Zenitkamarasysteme sind zentrische Aufstellungen direkt auf den Beobachtungspfeilern nicht möglich. Die Beobachtungen sollten aber nach Möglichkeit möglichst in der Nähe erfolgen. Aufgrund des teilweise schwierigen oder gar unmöglichen Zugangs, mussten die Kamerastandorte zum Teil in einiger Entfernung eingerichtet werden. Exzentrische Aufstellungen sind aber insofern problemlos, da die Bestimmung der ellipsoidischen Koordinaten mittels RTK-GPS-Messungen am tatsächlichen Standort der Kamera erfolgten, und zudem die Zentrierung der Lotabweichungen von den exzentrischen Kamerastandorten auf die Pfeiler durch Modellrechnungen ohne nennenswerten Genauigkeitsverlust möglich ist. Die erste Beobachtungsserie mit beiden Zenitkamarasystemen wurde am 13.07.05 auf den Stationen Bodio, Faido, Erstfeld und Amsteg durchgeführt (s. Abb. 4). Pro Station und System wurden zwischen 40–80 Einzellösungen (Bildpaare in zwei Lagen) gesammelt und zur Berechnung der Lotrichtung herangezogen. In einer zweiten Beobachtungsnacht am 19.07.05 wurde die Station Sedrun mit DIADEM gemessen. Während einer

Station	Ergebnis	Genauigkeit a posteriori
Bodio Pfeiler 12735901	Definitives Azimut 12735901 → 12735902 = 320° 40' 26.55"	$\sigma(Az) = 0.10''$
Faido Pfeiler 12525901	Definitives Azimut 12525901 → 12525902 = 111° 57' 24.43"	$\sigma(Az) = 0.21''$
Sedrun Pfeiler 12122901	Definitives Azimut 12122901 → 12122930 = 244° 51' 55.96"	$\sigma(Az) = 0.41''$
Amsteg Pfeiler 12124902	Definitives Azimut 12734902 → 11924910 = 356° 13' 05.80"	$\sigma(Az) = 0.40''$
Erstfeld Pfeiler 11924903	Definitives Azimut 11924903 → 11924145 = 145° 40' 10.17"	$\sigma(Az) = 0.81''$

Tab. 2: Gemessene astronomische Azimute zur Kontrolle der Kreismessungen.

Beobachtungszeit von ca. 6 Stunden wurden 130 Einzellösungen gesammelt. Die lange Beobachtungsdauer kann mit den schlechten Wetterverhältnissen mit zahlreichen, langsam vorüber ziehenden Wolkenfeldern begründet werden, welche eine zügigere Beobachtung verunmöglichten.

4. Messresultate

4.1 Lotabweichungen

Die Resultate der Lotrichtungsmessungen lassen sich mit einer einfachen Tabelle umfassend beschreiben. Tabelle 1 widerspie-

gelt die auf die Beobachtungspfeiler zentrierten Lotrichtungen F und L sowie die daraus gemäss Formeln (1) und (2) abgeleiteten Lotabweichungen. Die Genauigkeit der einzelnen Komponenten kann mit $\sigma(\xi, \eta) = 0.1''$ angegeben werden.

4.2 Azimute

Die Datenerfassung im Feld durch das Programmsystem ICARUS bzw. AZIMUT erfolgt automatisch und mögliche Ausreisser können bereits im Feld ohne Probleme eliminiert werden. Grobe Fehler auf Seiten der Messdaten sind dadurch ausgeschlossen. Aus Gründen der Zuverlässigkeit wurden

Lotabweichungen im Datum CH1903, bezogen auf Karten-Nord				
Station	$\xi ["]$	$\eta ["]$	$\xi [cc]$	$\eta [cc]$
Bodio Pfeiler	3.67	13.64	11.32	42.12
Faido Pfeiler	-4.93	9.79	-15.22	30.23
Erstfeld Pfeiler	16.74	10.72	51.64	33.09
Amsteg Pfeiler	18.85	-9.15	58.17	-28.24
Sedrun Pfeiler	2.25	4.41	6.93	13.62

Tab. 1: 2005 gemessene Lotabweichungen als Kontrolle der Geoidlösung CHGeo98 sowie für die im NEAT-Projekt verwendeten Korrekturwerte der Kreismessungen.

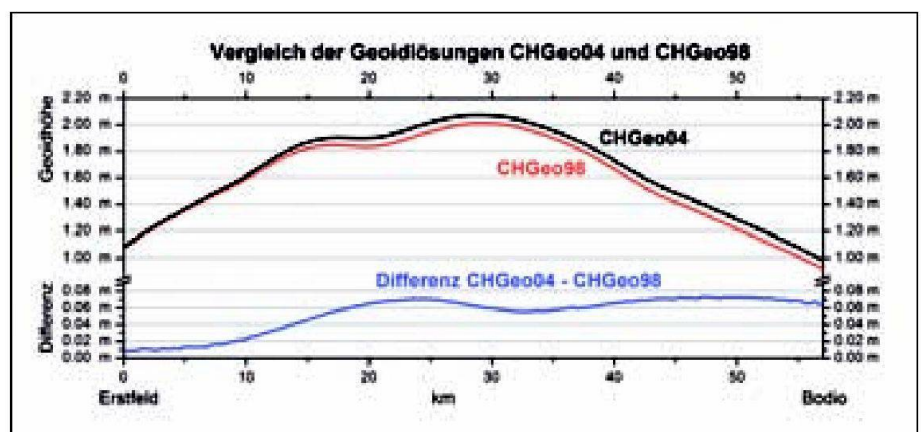


Abb. 6: Die Geoidlösungen CHGeo98 und CHGeo2004 im Vergleich. Obwohl die neuere Lösung bis zu 7 cm höhere Undulationen aufweist, bleiben die Auswirkungen auf die Höhen-Durchschlagsgenauigkeit moderat.

Differenzen Lotabweichungen (CHGeo2004) – LA beobachtet Datum CH1903, auf Kartennord bezogen							
		Modell CHGeo2004		gemessen		Differenz	
Station		ξ ber. ["]	η ber. ["]	ξ beob. ["]	η beob. ["]	d ξ ["]	d η ["]
Bodio	Pfeiler	3.66	13.19	3.67	13.64	-0.01	-0.45
Faido	Pfeiler	-5.37	9.10	-4.93	9.79	-0.44	-0.69
Erstfeld	Pfeiler	16.87	10.09	16.74	10.72	-0.13	-0.63
Amsteg	Pfeiler	18.53	-9.79	18.85	-9.15	-0.32	-0.64
Sedrun	Pfeiler	1.24	4.37	2.25	4.41	-1.01	-0.04

Tab. 3: Vergleich der Lotabweichungen bezogen auf die Geoidlösungen CHGeo98 und CHGeo2004.

im Anschluss an die Feldmessungen folgende Aspekte überprüft:

- Die korrekte Berechnung der Azimutwerte auf Grund der Felddaten (Satzmittel etc.) innerhalb des Programmsystems AZIMUT
- Die korrekte Berechnung des scheinbaren Ortes (α , δ) von Polaris unter Berücksichtigung aller modellierbaren Effekte wie Eigenbewegung, Präzession, Nutation, Parallaxe, Aberration und Polbewegung.
- Die korrekte Berechnung der astronomischen Azimute, basierend auf scheinbaren Örtern.

Die vom Astronomischen Institut der Universität Bern (Ploner 2005) und von C. Hirt (2005) durchgeführten Kontrollen der scheinbaren Sternörter zeigten eine hervorragende Übereinstimmung mit den ICARUS/AZIMUT-Werten, womit die Resultate als gesicherte und zuverlässige Werte an den Auftraggeber übergeben werden konnten (Tab. 2).

5. Vergleich der Geoidlösungen CHGeo98 und CHGeo2004

Zur Kontrolle und Sicherstellung der bis dato verwendeten Geoidhöhen und Lotabweichungen wurde von U. Marti (swiss-topo) die neue Geoidlösung CHGeo2004 mit Einbezug der neuen Lotabweichungen gem. Tabelle 1 berechnet und mit CHGeo98 verglichen.

5.1 Vergleich der Geoidundulationen

Der berechnete Unterschied zwischen der im Projekt verwendeten Höhenreferenz CHGeo98 und dem mit neuen Messungen verbesserten Modell CHGeo2004 verläuft gemäss Abbildung 6 recht moderat, so dass kein signifikanter Einfluss zu erwarten ist. Ab Kilometer 17 bis zum Südportal bei km 57 bleibt die Differenz innerhalb von 2 cm.

5.2 Vergleich der Lotabweichungen

Die ermittelten Unterschiede bezüglich der Lotabweichungen sind in Tabelle 3 ausgewiesen.

Der Vergleich der Lotabweichungen zeigt, dass die Geoidlösung CHGeo98 den Ansprüchen an die Genauigkeitsanforderungen von Alptransit vollauf zu genügen vermochte. Die in Abbildung 7 ausgewiesenen Unterschiede zu CHGeo2004 bleiben in der Grössenordnung der Messgenauigkeit oder darunter.

6. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der astro-geodätischen Kontrollmessungen zeigten folgende Erkenntnisse:

- 1) Sowohl die Azimut- wie auch die Lotrichtungsmessungen sind sehr genau durchgeführt worden und die Resultate sind dementsprechend zuverlässig. Sie erfüllen vollumfänglich die hohen Genauigkeitsansprüche der Auftraggeber.
- 2) Die astronomischen Azimute unterscheiden sich nicht signifikant von den Azimuten aus GPS-Koordinaten (Schätti und Ryf, 2007)
- 3) Die astronomischen Azimute wurden als Beobachtungen in einem LTOP-Gesamtausgleich zur Bestimmung der Koordinaten des Grundlagentzuges verwendet und zeigten eine kleine aber tolerierbare Verdrehung der Portalnetze im Norden. Die Grössenordnung

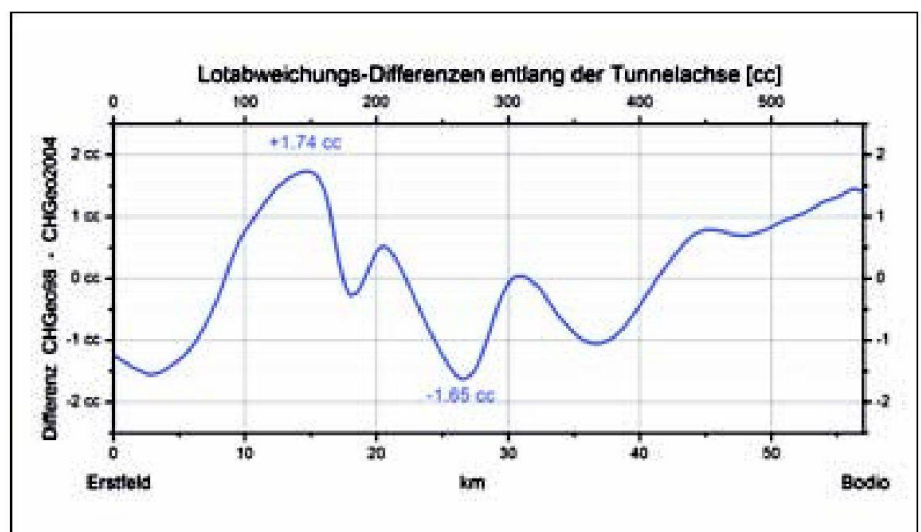


Abb. 7: Der Unterschied in der Gesamt-Lotabweichung $\sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ zwischen den Geoidlösungen CHGeo98 und CHGeo2004 bleibt in einem engen Band von ± 1.7 cc (0.17 mgon), was beweist, dass das Modell CHGeo98 den Genauigkeitsvorgaben des Projektes Gotthard-Basistunnel zu genügen vermag.

bleibt innerhalb der statistischen Signifikanzgrenze.

- 4) Die Unterschiede zu den Kreiselreduzierten Werten sind tolerierbar, ohne dass befürchtet werden muss, dass die Durchschlagsgenauigkeit vermindert wird.
- 5) Die Ergebnisse der Lotrichtungsmessungen zeigten, dass die verbesserte Geoidlösung CHGeo2004 gegenüber der im Projekt verwendeten Geoidlösung CHGeo98 kleine Änderungen hervorruft. Diese bleiben aber so gering, dass sich der Aufwand für eine Projektanpassung nicht gerechtfertigt hätte.

Zusammenfassend darf gesagt werden, dass die Astro-geodätischen Messungen zu gesicherten Validierungen von durchgeführten Schwerefeld-Reduktionen verhalfen und dadurch die Zuverlässigkeit der Tunnelvermessung zu steigern vermochten.

Referenzen:

Bürki, B., M. Ganz, Ch. Hirt, U. Marti, A. Müller, PV Radogna, A. Schlatter, A. Wiget (2005): Astrogeodätische und gravimetrische Zusatzmessungen für den Gotthard-Basistunnel. Vergleiche zwischen Astogeodätischen und gravimetrischen Messungen vom Sommer 2005 mit modellbasierten Werten. Swisstopo-Report 05-34.

Haag, R., A. Ryf & R. Stengele (1996): «Grundlagenvermessung für extrem lange Tunnel am Beispiel des Gotthard-Basis-Tunnels.» XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.

Haag, R., F. Bräker & R. Stengele (1998): «A 57 km long Railway Tunnel through the Swiss Alps and its planned Survey.» Proc. XXI. International Congress FIG Brighton,

Haag, R. & R. Stengele (1999): «Vermessungstechnische Grundlagen und Herausforderungen beim Projekt Alp-Transit-Gotthard-Basistunnel.» Moderne Sensorik für die Bauvermessung, VDI-Gesellschaft Bautechnik, Bericht 1454, S. 225–240.

Hirt, C. (2005): Persönliche Kommunikation.

Hirt, C. und Bürki, B. (2002): «The Digital Zenith Camera – A New High-Precision and Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Vertical Deflections.» Proc. of the 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy, Thessaloniki (ed. I. Tziavos): pp. 161–166.

Ploner, M. (2005): Persönliche Kommunikation.

Schätti, I. (2006): «Herausforderungen bei der Absteckung des Gotthard-Basis-Tunnels.» Geomatik Schweiz, Heft 06/2006.

Schätti, I. und A. Ryf (2007): «AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Grundlagenvermessung, letzte Kontrollen vor dem ersten Durchschlag.» XV. Konferenz für Ingenieurvermessung, Graz.

Stengele, R. & R. Haag (1998): «Geodätische Aspekte bei der Vermessung des 57 km lan-

gen Gotthard-Basistunnels.» Messen in der Geotechnik 98, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, S. 301–312.

Stengele, R. (2007): «Erster Hauptdurchschlag im Gotthard-Basistunnel: Tunnelvermessung in Theorie und Praxis.» 15. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung. Graz.

Zanini, M., R. Stengele & M. Plazibat (1993): «Kreiselazimute in Tunnelnetzen unter Einfluss des Erdschwerefeldes», Berichte des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, Nr. 214.

Beat Bürki und Sébastien Guillaume
ETH Zürich, Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie
CH-8093 Zürich
buerki@geod.baug.ethz.ch
guillaume@geod.baug.ethz.ch

